BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

ÉLECTROTECHNIQUE

SESSION 2008

ÉPREUVE E4.1

Étude d'un système technique industriel
Pré-étude et modélisation

Durée : 4 Heures ~ Coefficient : 3

Calculatrice à fonctionnement autonome autorisée conformément à la circulaire n°99-186 du 16/11/99. L'usage de tout autre matériel ou documents est interdit.

Les parties A, B, et C sont indépendantes

- Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.
- Utiliser les notations indiquées dans le texte, justifier toutes les réponses, présenter clairement les calculs et les résultats.

PONT FLAUBERT

Présentation, enjeu et problématiques

Le pont Flaubert sur la Seine est un projet imaginé dans les années 60, qui voit le jour aujourd'hui et qui sera sous les feux de la rampe lors du rassemblement des grands voiliers à Rouen pour l'Armada 2008.
En se situant en aval des cinq ponts existants de Rouen, c'est une pièce majeure de la liaison entre les autoroutes A13 au sud et A150 au nord, qui a pour but de décharger l'ouest de la ville d'une part importante du trafic.

La logique du projet :
Les ponts existants à Rouen permettent la navigation fluviale mais marquent la limite de la navigation maritime (seules les péniches peuvent passer).
La construction d'un nouvel ouvrage ne doit pas réduire la zone maritime portuaire notamment pour les navires de croisière qui doivent accoster au plus près du centre ville.
En outre, la ville accueille tous les quatre ans les plus grands voiliers du monde lors de l'Armada. Cet événement majeur attire une foule considérable et contribue au rayonnement de la ville et de la région, et indirectement à son économie.
L'ouvrage doit donc permettre à la fois le maintien de l'activité portuaire et le passage des grands voiliers au plus fort de la marée.
Le choix d'un pont levant s'est donc imposé en raison d'un coût nettement inférieur à une solution « tunnel sous la Seine ».

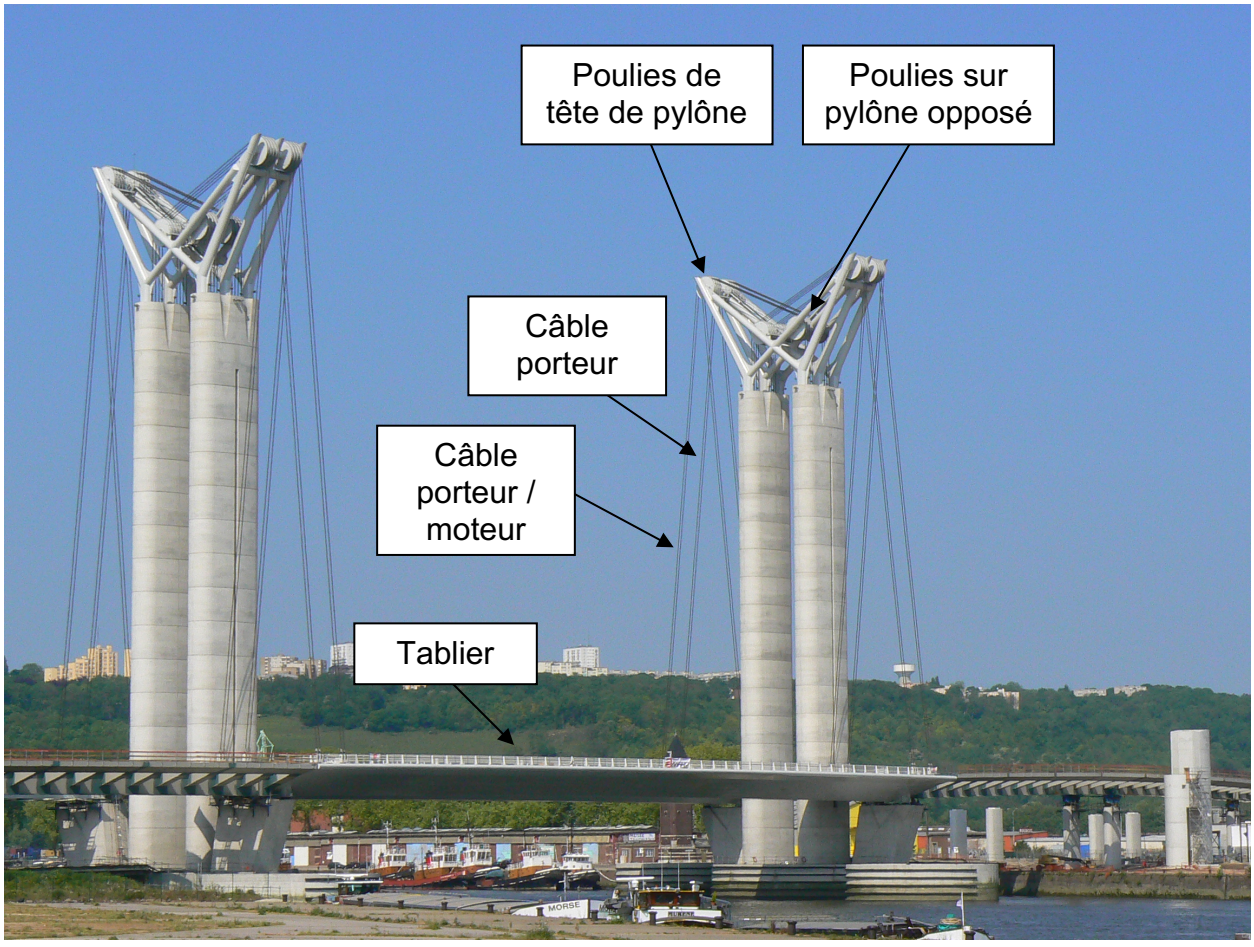
Caractéristiques du pont :
dessiné par les architectes du Stade de France et du viaduc de Millau ;
120 mètres de longueur ;
89 mètres de hauteur totale (plus haut d'Europe) ;
10 minutes environ pour les phases de montée et descente ;
30 manœuvres par an (paquebots de croisière, Armada) ;
1300 tonnes par tablier (les 2 tabliers amont et aval peuvent fonctionner indépendamment) ;
affaire de 60 Millions d'euros, qui se décompose en 3 lots (Génie Civil, Charpente Métallique et Mécanismes).

Enjeu :
Le sujet de l'épreuve E4 portera sur l'étude des mécanismes du pont dont l'enjeu est d'assurer le levage des deux tabliers, compte tenu des contraintes suivantes :

- la durée des manœuvres doit être la plus courte possible afin de perturber le moins possible le trafic routier ;
- le nombre de manœuvres est de 30 par an ;
- la fiabilité et la sécurité doivent être optimales.

Problématiques :

Le levage des tabliers est assuré par huit treuils et chaque treuil est entraîné par quatre moto-réducteurs.
Cette solution a été adoptée dans un souci de redondance et pour optimiser la maintenance.
L'étude doit démontrer la pertinence de cette solution technologique.
L'épreuve E41 portera sur la modélisation, la compréhension et le dimensionnement de certains éléments de la chaîne cinématique d'un treuil.



Les parties A, B et C sont indépendantes.

A) ETUDE MECANIQUE ET DIMENSIONNEMENT DE LA MOTORISATION

Dans la partie A, nous allons chercher à déterminer les contraintes mécaniques qui s'exercent au niveau des arbres moteur.

Pour chaque tablier, on considère que l'effort est réparti équitablement sur les 4 treuils. On s'intéresse au fonctionnement et au dimensionnement d'un treuil, qui assure donc la levée d'une masse M équivalente au quart de la masse du tablier. On étudiera donc le système décrit en figure 1 :

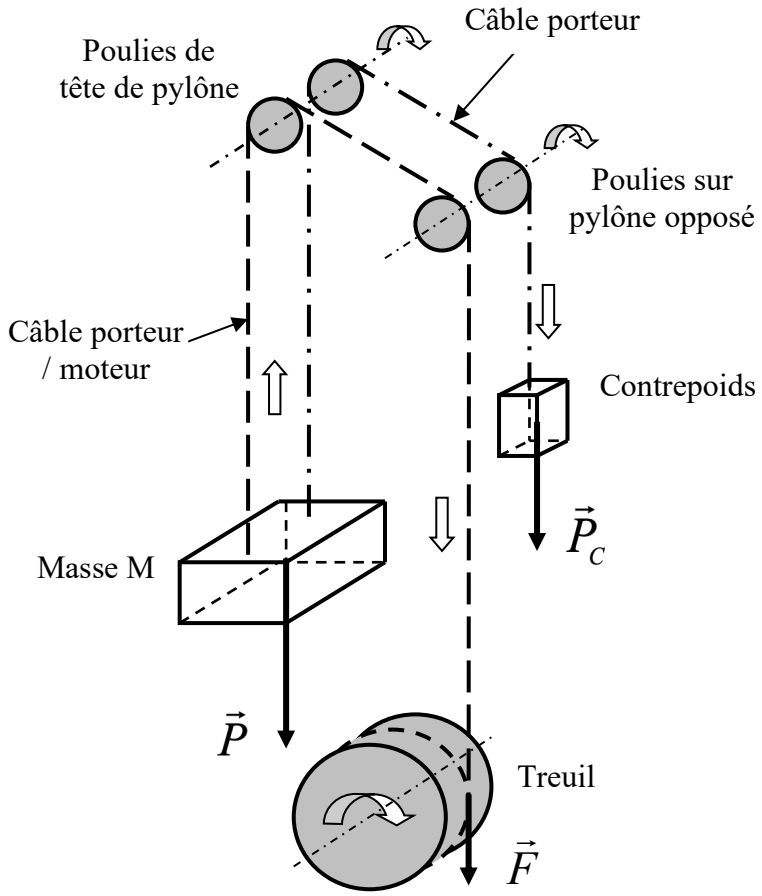


Figure 1

masse M = 325 tonnes (cette masse est équivalente au quart de la masse du tablier) ;
masse d'un contrepoids : M_C = 237 tonnes ;
diamètre du tambour du treuil (diamètre d'enroulement du câble) : D_T = 1,6 m ;
accélération de la pesanteur : g = 9,8 $m.s^{-2}$.

A.1. Etude statique : maintien du tablier en position intermédiaire

A.1.1. Lorsque le système est en équilibre, établir la relation entre $\vec{P}$ (poids de la masse M), $\vec{P}_C$ (poids du contrepoids) et $\vec{F}$, force exercée par le treuil sur le câble porteur / moteur.

A.1.2. Calculer, en kN, l'intensité F de la force $\vec{F}$.
En tenant compte des efforts supplémentaires liés au vent, l'intensité F de la force vaut 957 kN.

A.1.3. Calculer le moment du couple T_T au niveau du tambour du treuil dans ces conditions.

A.2. Montée du tablier à vitesse constante

Les efforts liés au vent sont pris en compte. Les frottements autres que ceux liés au vent sont pris en compte dans les rendements définis ci-après. Les autres pertes sont négligées.
Pour des raisons de sécurité et de maintenance, chaque treuil est mis en mouvement par 4 moto-réducteurs. La sortie de chaque moto-réducteur est solidaire d'un pignon, qui engrène sur une des 2 couronnes. Les 2 couronnes sont solidaires du tambour du treuil (voir figure 2) :

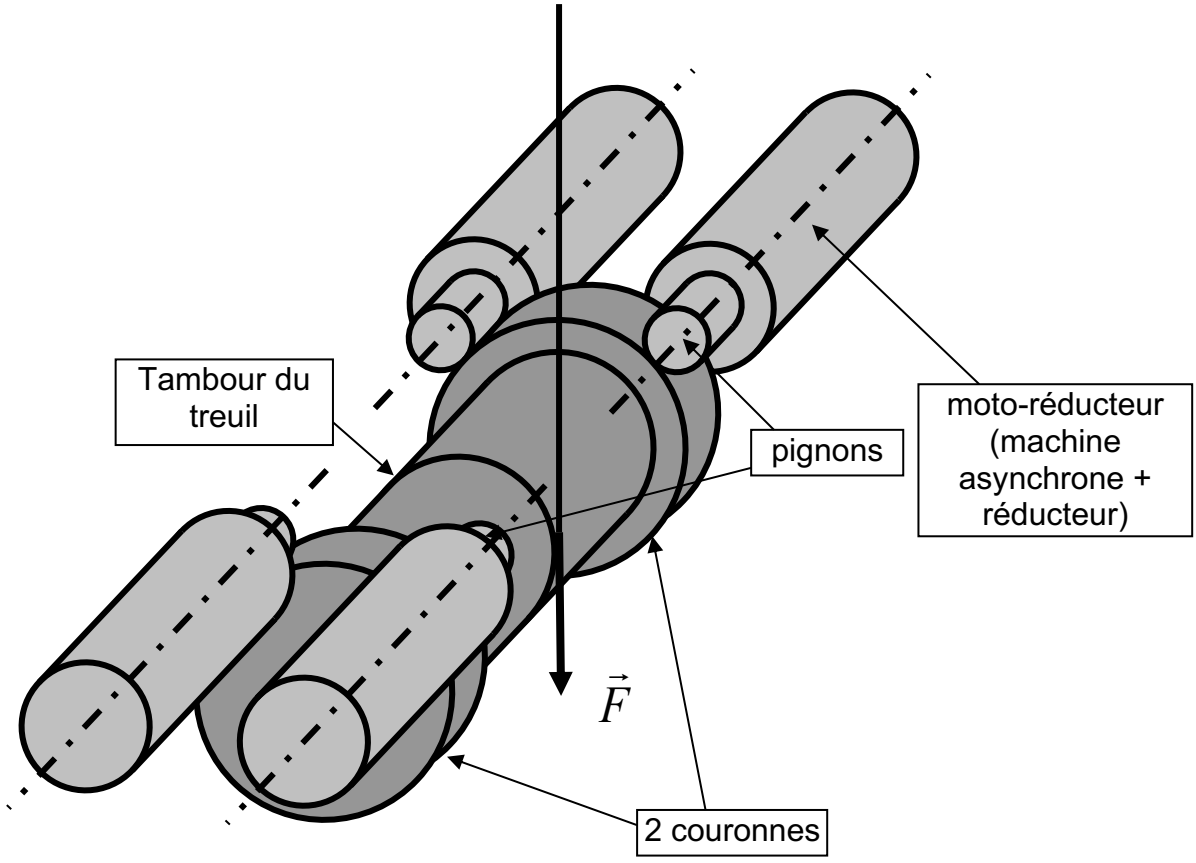


Figure 2

diamètre du tambour du treuil : D_T = 1,6 m ;
diamètre de chaque couronne : D_C = 3,0 m ;
diamètre de chaque pignon : D_P = 0,40 m ;
rapport de réduction de chaque réducteur : r = 218 ;
le câble s'enroule sur le tambour en une seule couche.

La vitesse de montée du tablier est constante et vaut v = 4,2 **m.min^{-1}**.
A.2.1. Calculer la vitesse de rotation n_T du tambour, en tr.min^{-1}.
A.2.2. Calculer la vitesse de rotation n_P de chaque pignon, en tr.min^{-1}.
A.2.3. Montrer que la vitesse de rotation n_{MAS} de chaque machine asynchrone vaut 1366 tr.min^{-1}.
A.2.4. Justifier que le moment du couple au niveau du tambour est le même qu'au A.1.3.

On fera l'hypothèse que les 4 machines asynchrones fournissent la même puissance.
Le rendement du système d'enroulement/engrènement/réduction vaut η=0,85.
A.2.5. Calculer la puissance utile $P_{u\,MAS}$ de chaque machine asynchrone.
A.2.6. Calculer le moment du couple utile $T_{u\,MAS}$ pour chaque machine asynchrone.

A.3. Démarrage du tablier à la montée

En ce qui concerne la mise en vitesse du tablier en montée, le cahier des charges impose une accélération linéaire, de 0 à 4,2 m.min^{-1}, en 15 secondes.
Pour chaque machine asynchrone, le couple résistant pendant cette phase est constant et son moment vaut T_R = 138 N.m.
Le moment d'inertie équivalent de l'ensemble de la chaîne cinématique, ramené à l'axe de **chaque machine asynchrone**, vaut J_{eq} = 2,5 kg.m^2.

A.3.1. Calculer la variation de vitesse angulaire $\left(\frac{d\Omega_{MAS}}{dt}\right)$ de chaque machine asynchrone pendant cette phase d'accélération.
A.3.2. Appliquer le principe fondamental de la dynamique à la machine asynchrone pendant cette phase d'accélération. En déduire la valeur du moment du couple utile $T_{u\,MAS}$ pendant cette phase.

A.4. Influence d'une modification de la durée de montée

La durée de montée du tablier influe directement sur la durée de blocage du trafic routier. On cherche donc à minimiser cette durée de montée.

A.4.1. A partir de la figure 1, calculer l'énergie E_1 nécessaire à la levée de la masse M sur une hauteur de 45m. On rappelle que la masse M correspond à la masse d'un quart de tablier.
A.4.2. Calculer l'énergie E_2 fournie par la descente du contrepoids de masse M_C.
A.4.3. En déduire l'énergie E fournie par la motorisation en considérant le rendement du système d'enroulement/engrènement/réduction toujours égal à 0,85. On exprimera cette énergie en joules puis en kilowattheures.

A.4.4. Calculer la durée de montée Δt si on considère que cette montée se fait à la vitesse constante v = 4,2 $m.min^{-1}$.
A.4.5. Donner la relation entre l'énergie E, la puissance P transmise par la motorisation et la durée Δt de montée.
A.4.6. Calculer la puissance P transmise par la motorisation dans le cas d'une montée d'une durée Δt calculée au A.4.4.
A.4.7. Calculer la puissance P' qui devrait être transmise par la motorisation si la durée de montée était réduite à $\Delta t'$=2 minutes.
A.4.8. Quelle serait l'influence d'une réduction de la durée de montée sur le dimensionnement des machines asynchrones ?

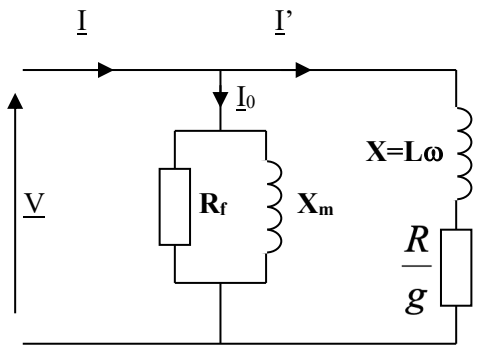
B) PILOTAGE DE LA MACHINE ASYNCHRONE LORS DES PHASES DE MONTEE ET DESCENTE

Cette partie concerne l'étude d'une des 4 machines asynchrones associées au treuil de la partie précédente. La machine asynchrone est alimentée par un onduleur triphasé, dont **la fréquence de sortie est variable**.
L'onduleur fonctionne en Modulation de Largeur d'Impulsion, les tensions de sorties sont donc non sinusoïdales.
Dans cette partie, nous nous intéressons au comportement de la machine à la fréquence du fondamental. **Les tensions et intensités seront donc supposées sinusoïdales**.

Caractéristiques nominales de la machine asynchrone en fonctionnement moteur :

- machine asynchrone triphasée, rotor à cage ;
- 2 paires de pôles ;
- puissance utile nominale 37 kW ;
- alimentation 230V / 400V – 50Hz ;
- couplage étoile des enroulements statoriques ;
- les pertes joule statoriques, les pertes fer rotoriques et les pertes mécaniques sont négligées.

On donne en figure 3 le **modèle équivalent pour une phase de la machine** asynchrone :



R_f permet de représenter les pertes fer ;
X_m est la réactance magnétisante du stator ;
X est la réactance totale de fuite vue du stator ;
ω est la pulsation des courants statoriques ;
$\omega = 2\pi f$;
R est la résistance du rotor ramenée au stator ;
g est le glissement.

Figure 3

Caractéristiques des éléments du modèle équivalent :

R_f = 300 Ω ; X_m = 25 Ω ; X = 0,70 Ω ; R = 212 mΩ

B.1. Etude en montée à vitesse constante

La machine asynchrone fonctionne en moteur. Sa vitesse de rotation est constante et vaut **n = 1366 tr.min^{-1}**. Elle délivre une puissance utile constante **P_u = 19,7 kW**.
L'onduleur fournit une tension v(t) considérée comme sinusoïdale, de valeur efficace **V = 215 V** et de fréquence **f = 47 Hz**.

B.1.1. Calculer la vitesse de synchronisme n_S, en tr.min^{-1}.
B.1.2. En déduire le glissement g.
B.1.3. Calculer la puissance transmise au rotor P_{tr}.
B.1.4. Calculer les pertes fer statoriques p_f.
B.1.5. Calculer la puissance absorbée P_{abs}.
B.1.6. Calculer le rendement η de la machine asynchrone dans ces conditions.

B.2. Expression du couple électromagnétique

B.2.1. A partir de la figure 3, exprimer l'intensité efficace I' en fonction de V, R, L, ω et g.
B.2.2. Exprimer la puissance P_{tr} transmise au rotor en fonction de V, R, L, ω et g.
B.2.3. Montrer que l'on peut exprimer le moment du couple électromagnétique T_{em} de la façon suivante :

$$T_{em} = \frac{3pR}{g\omega} \frac{V^2}{(L\omega)^2 + \left(\frac{R}{g}\right)^2}$$

B.2.4. Montrer que, lorsque g est faible, on peut négliger un terme et on peut alors écrire :

$$T_{em} \approx \frac{3p^2}{60.2\pi.R}\left(\frac{V}{f}\right)^2 (n_S - n)$$ où n_s et n sont exprimées en tr.min^{-1}.

B.2.5. En déduire que lorsque g est faible et que le rapport $\frac{V}{f}$ est maintenu constant, on peut écrire :

$$T_{em} \approx A(n_S - n).$$

Déterminer l'expression littérale de A. Montrer que A = 3,14 N.m.min.tr^{-1}.
B.2.6. A partir de la question précédente, calculer le moment du couple électromagnétique T_{em} dans les conditions de montée à vitesse constante.

B.3. Fonctionnement à (V/f) = constante

Les caractéristiques du fonctionnement de la machine asynchrone en **montée à vitesse constante** sont connues :

- **n = 1366 tr.min^{-1}** ; **P_u = 19,7 kW** ; **T_{em} = 138 N.m ;**
- **n_S = 1410 tr.min^{-1}** ; fréquence de sortie du variateur : **f =47 Hz** ; tension simple de sortie du variateur : **V= 215V.**

Dans la partie B.3. on s'intéresse au fonctionnement de la machine asynchrone alimentée par l'onduleur qui fonctionne à **(V/f) = constante**.

B.3.1. Caractéristique Tem(n) en montée

On rappelle que, dans les conditions définies ci-dessus, on peut écrire :

$$T_{em} \approx 3{,}14(n_S - n).$$

B.3.1.1. Sur le **document réponse 1**, tracer la caractéristique T_{em} = f(n) pour un fonctionnement en montée.

B.3.1.2. Indiquer sur le **document réponse 1** le point de fonctionnement F_1 correspondant à la montée à vitesse constante définie ci-dessus.

B.3.2. Caractéristique Tem(n) en descente

La descente du tablier s'effectue à la même vitesse que la montée, mais en sens inverse : **v' = - 4,2 m.min^{-1}**. Dans ces conditions, la machine asynchrone tourne à la vitesse **n' = - 1366 tr.min^{-1}**. La valeur du moment du couple électromagnétique T_{em}' de la machine asynchrone permettant de freiner la descente du tablier vaut **T_{em}' = 100N.m**.

B.3.2.1. Montrer que la machine asynchrone fonctionne en génératrice.

L'onduleur fonctionnant à (V/f) = constante, la relation suivante reste vérifiée en descente :

$$T_{em}' \approx 3{,}14(n_S' - n').$$

B.3.2.2. Sur le **document réponse 1**, indiquer le point de fonctionnement F_2 correspondant à la descente à vitesse constante définie ci-dessus.

B.3.2.3. Sur le **document réponse 1**, tracer la caractéristique T_{em}' = f(n') pour un fonctionnement en descente.

B.3.2.4. Déterminer la vitesse de synchronisme n_S'.

B.3.2.5. Calculer la fréquence de sortie f' du variateur.

B.3.2.6. Montrer que le glissement g', correspondant à la descente à vitesse constante définie ci-dessus, vaut g' = - 2,4%.

B.3.2.7. Calculer la puissance transmise P_{tr}' pour la descente à vitesse constante définie ci-dessus.

C) GESTION DE L'ENERGIE LORS DE LA PHASE DE DESCENTE

Le système doit être dimensionné pour être capable de freiner électriquement la descente simultanée des 2 tabliers. Ce freinage se fait par dissipation d'énergie.
Les 32 machines asynchrones permettant le levage ou le freinage des 2 tabliers sont réparties en 4 groupes de 8 machines.

On donne figure 4 ci-dessous le schéma de l'alimentation électrique de chaque groupe de 8 machines à partir du secondaire du transformateur principal :

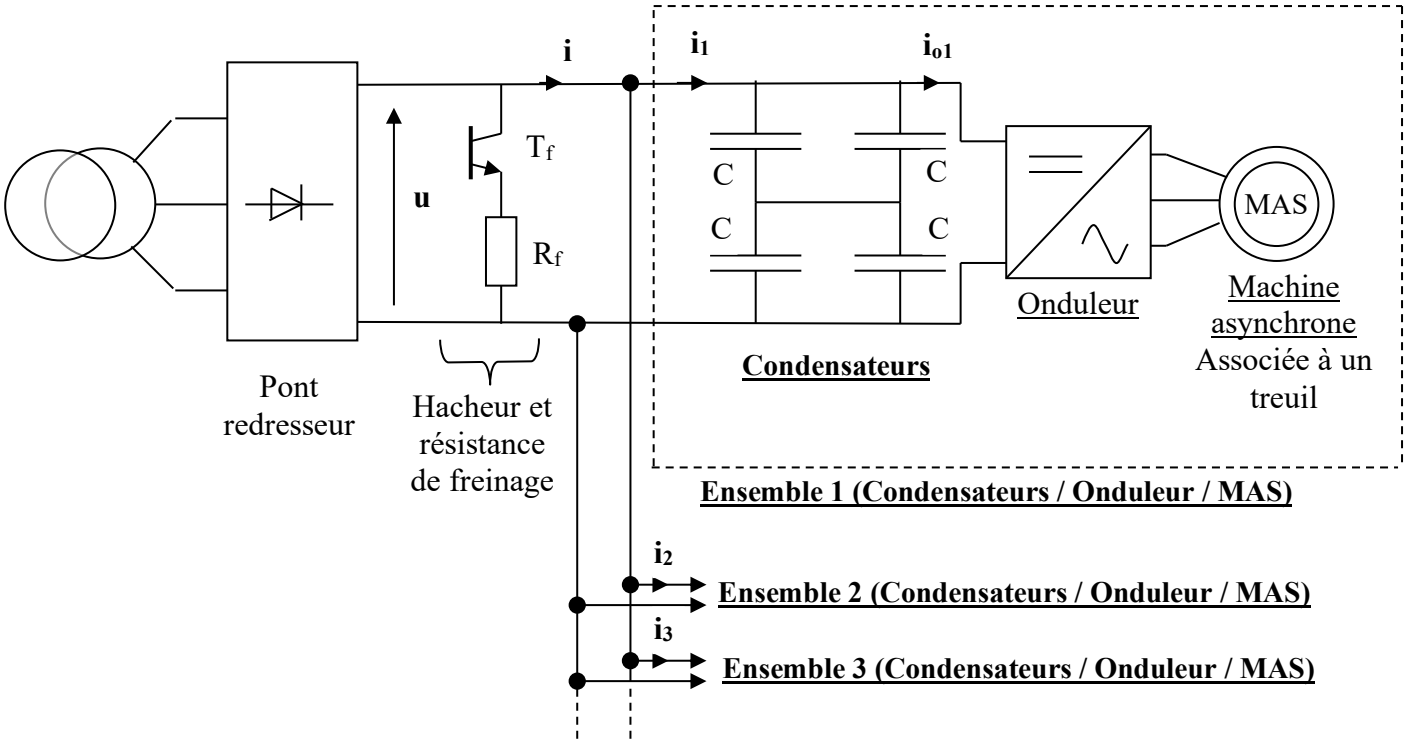


Figure 4

On donne : $R_f = 0{,}80\Omega$, C = 220 mF.
La tension maximale supportée par chaque condensateur C vaut 400V.
La tension **u** (bus continu) peut atteindre 760V.

Un même pont redresseur alimente **8 ensembles (Condensateurs/Onduleur/MAS) identiques, branchés en parallèle**.

On rappelle que, lors de la descente, chaque machine asynchrone fonctionne en **génératrice**.

Le transistor T_f est supposé parfait et fonctionne en commutation.

C.1. Etude de la charge des condensateurs

On étudie l'ensemble 1. L'influence des autres ensembles est négligée.

C.1.1. Pourquoi l'alimentation électrique ne permet-elle pas le retour de l'énergie vers le transformateur relié au réseau électrique de distribution ?
C.1.2. Pourquoi est-il nécessaire d'avoir des condensateurs montés en série ?

Dans un premier temps, le transistor T_f n'est pas commandé.
On s'intéresse à la charge des condensateurs qui provoque l'élévation de la tension **u** du bus continu.
On fait l'hypothèse que, lors de la phase de descente, l'onduleur se comporte comme un générateur parfait de courant continu. On étudiera le schéma simplifié figure 5, dans lequel C_{eq} est le condensateur équivalent aux 4 condensateurs C (C_{eq} = C).

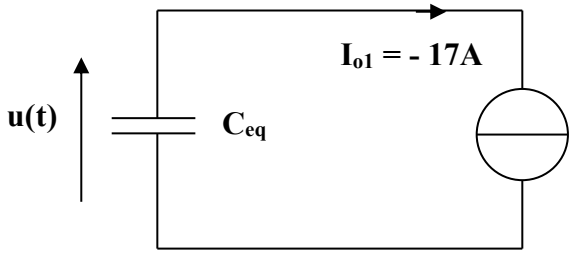


Figure 5

C.1.3. A partir de la figure 5, écrire la relation entre I_{o1}, C_{eq} et $\frac{du}{dt}(t)$.
C.1.4. En déduire l'expression de u(t) en fonction de I_{o1}, C_{eq}, t et U_0, tension u(t) à l'instant t=0.
C.1.5. On donne U_0=560V. Calculer la durée t_0 nécessaire pour que la tension u(t) atteigne 750V.
C.1.6. Tracer sur le **document 2, figure 7**, la courbe u(t) pendant cette phase.

C.2. Etude du hachage

On fait l'hypothèse que les 8 onduleurs de la figure 4 se comportent comme des générateurs parfaits de courant, fournissant chacun un courant d'intensité $\mathbf{I_o = -17A}$.
On suppose maintenant que le transistor T_f est commandé automatiquement dès que la tension u(t) atteint 750V, et on la considère alors comme constante. Ce hacheur est commandé périodiquement à la fréquence f=1/T, avec un rapport cyclique α :

- entre 0 et αT, T_f est passant ;
- entre αT et T, T_f est bloqué.

On montre que la puissance à dissiper dans la résistance de freinage a pour valeur P_{Rf} =102kW.

Compte tenu des hypothèses, le schéma de la figure 4 se ramène au schéma simplifié de la figure 6 ci-dessous :

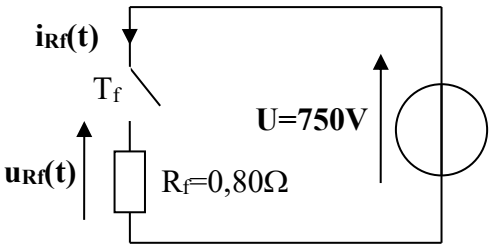


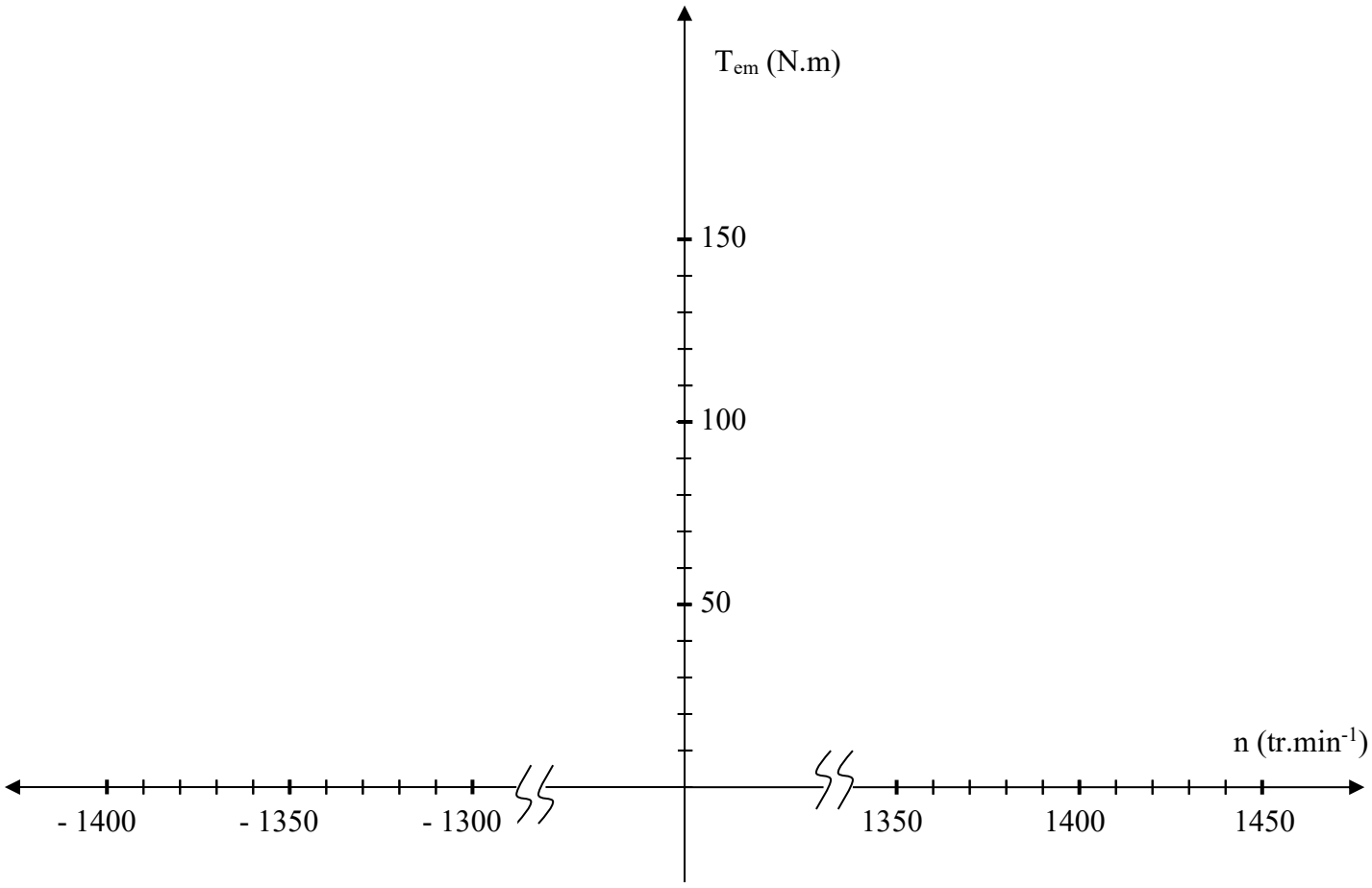
Figure 6

C.2.1. Tracer sur le **document 2, figure 8**, la courbe $u_{Rf}(t)$.
C.2.2. Exprimer la valeur efficace U_{Rf} de la tension $u_{Rf}(t)$, en fonction de U et α.
C.2.3. Exprimer la puissance moyenne P_{Rf} dissipée dans la résistance de freinage R_f, en fonction de U, R_f et α.
C.2.4. Calculer la valeur de α permettant de dissiper la puissance P_{Rf}=102kW renvoyée par les 8 onduleurs.

C.3. Etude du comportement thermique d'une résistance de freinage

C.3.1. En reprenant la valeur de la puissance P_{Rf} fournie à la question C.2.5, calculer l'énergie E_{Rf} consommée par la résistance pendant la descente du tablier, d'une durée de 10 minutes. On exprimera cette énergie en joules puis en kilowattheures.
C.3.2. En faisant l'hypothèse que la résistance puisse être considérée comme un système isolé d'un point de vue thermique, calculer l'élévation de température ΔT de cette dernière à l'issue de la descente du tablier. On donne la capacité thermique massique de la résistance de freinage : $C_{Rf} = 15.10^3$ J.°C^{-1}.
C.3.3. Cette hypothèse vous paraît-elle réaliste ? Justifiez votre réponse.
C.3.4. Pour quelle raison les concepteurs du système ont-ils prévu une ventilation forcée ? Justifiez votre réponse.

Document réponse 1
A remettre avec la copie



Caractéristiques à V/f=constante

Document réponse 2

A remettre avec la copie

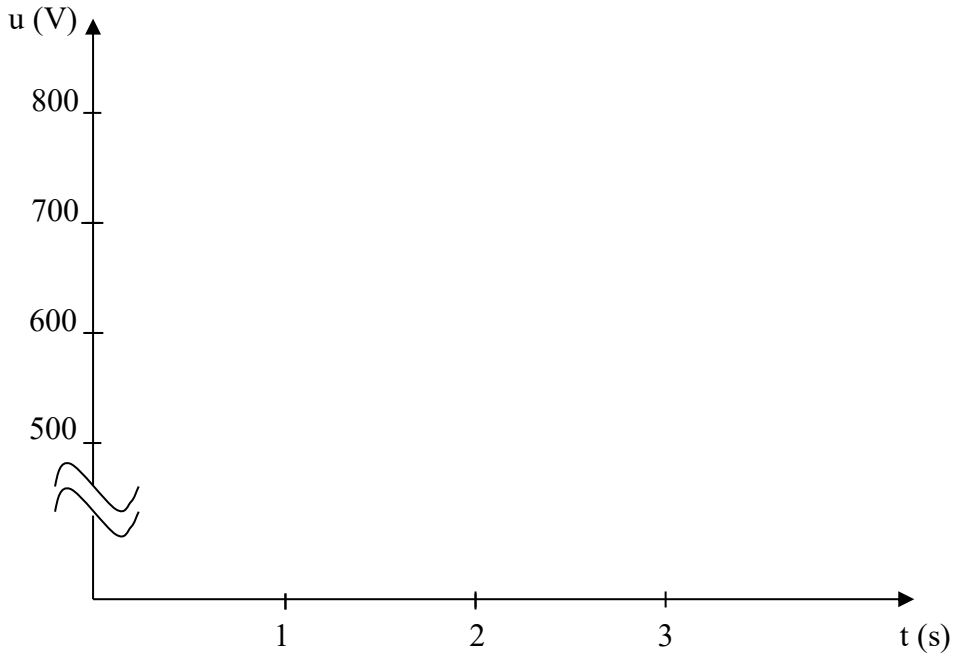


Figure 7

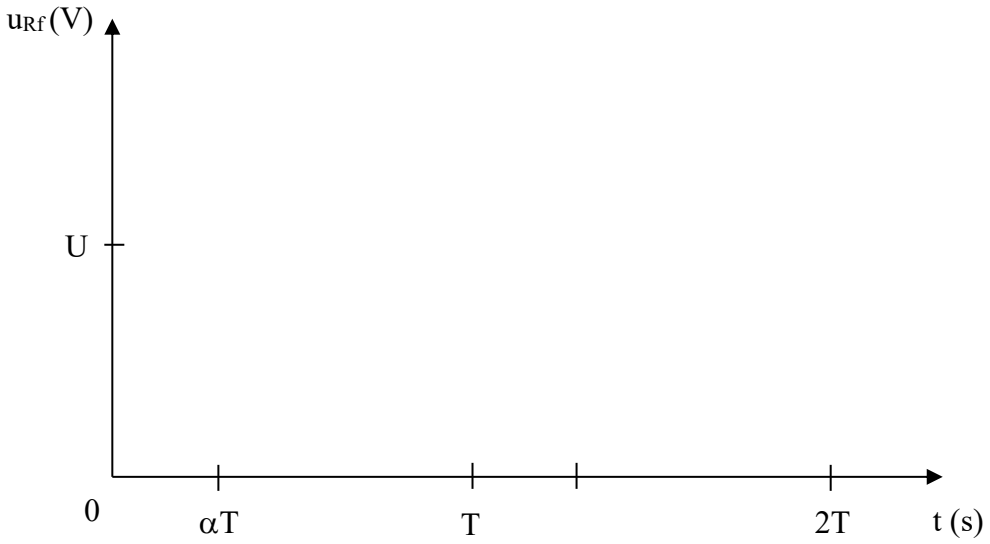


Figure 8